

## 2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

### 2 *Optical Fiber Communication Technology to Create Future Telecom Infrastructure*

#### 2-1 標準外径の空間多重光ファイバによる伝送技術

##### 2-1 *Space Division Multiplexing over Standard-cladding-diameter Optical Fibers*

坂口 淳 ベンジャミン・J・パットナム ルーベン ソアレス ルイス

SAKAGUCHI Jun, Benjamin J. PUTTNAM, and Ruben Soares LUÍS

通信インフラの容量拡大に向けた空間多重 (SDM: Space Division Multiplexing) 光ファイバの開発が進められており、近年では早期実用化に向けて、従来の通信用光ファイバと同等のクラッド径をもつ標準外径型 SDM 光ファイバが注目されている。NICT では各種の標準外径 SDM ファイバを用い、単一区間での 1 Pb/s 以上の超大容量伝送や、長距離で 100 Tb/s を上回る大容量伝送を実証してきた。非結合 4 コアファイバではマルチバンド波長多重を追求し、単一区間での伝送容量が 1 Pb/s を超えたほか、長距離伝送で伝送容量・距離積の記録を達成している。ランダム結合 19 コアファイバや 55 モードファイバでは 4 コアファイバ以上の伝送容量が達成された。15 モードファイバでは初めての中継伝送を実施し、1,001 km の伝送距離が達成されたほか、実環境テストベッドでの実証が行われた。本稿ではこれらの成果を概説する。

Space Division Multiplexing (SDM) using advanced optical fibers has been actively developed to realize ultra-large-capacity optical networks. Especially, standard-cladding-diameter SDM fibers with a common 125  $\mu\text{m}$  cladding diameter are drawing attention for early deployment. Using various standard-cladding-diameter SDM fibers, we demonstrate ultra-high-capacity transmission of over 1 Pb/s in a single span, as well as high-capacity (over 100 Tb/s) and long-distance (over 1000 km) transmission. Combined with multiband wavelength division multiplexing technology, uncoupled 4-core fibers realized a transmission capacity exceeding 1 Pb/s, and the highest capacity-distance product in long-distance transmission. Using a randomly-coupled 19-core fiber and a 55-mode fiber, we achieve even larger transmission capacities. First repeated transmission over 15-mode fiber resulted in a transmission distance of 1,001 km as well as the transmission capacity of 273.6 Tb/s. Field trial of deployed 15-mode fibers was also performed in a network test bed. In this paper, we summarize these recent achievements.

### 1 まえがき

インターネットの黎明期である 1990 年代から現在まで 30 年あまり、我が国の通信インフラで交換されるデータの通信量は年率数十パーセントの急ペースで増加し続け、毎秒 30 テラビットの領域に達した [1]。この上昇傾向は経済動向に大きく依存しておらず、ICT サービスの進化に伴って今後も長期にわたり増加が進んでいくと予想される。国内のみならず、世界各地で同様の傾向がみられる。この通信需要を支える基幹通信網の容量は、100 G コヒーレント技術を活用した場

合にはファイバー本あたり毎秒 10 テラビット程度であり、現在導入の進行中である 400 G コヒーレント技術を活用した場合でも毎秒数十テラビットである。陸上用の基幹回線は直径数十 mm の管路を通して構築され [2]、管路あたりのファイバ収容数は最大でも数千本に限られる [3]。海底ケーブルにおいては更にファイバ収容数は少なく、数十本程度である [4]。現状のまま技術革新が進まなければ、30 ~ 40 年の後には、通信インフラが情報流通を支えきれなくなってくる恐れがある。そのため既存技術の枠を超えてファイバの伝送容量を上げるための取組が行われている。

## 2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

ファイバ伝送容量を上げるための第一のカギはマルチコアファイバ技術である。従来の光ファイバ(単一モードファイバ(SMF: Single Mode Fiber))では直径125 μmのクラッド領域の中心部にある、直径約10 μmのコア部だけに信号光を閉じ込めて情報伝送を行うが、マルチコアファイバではクラッド内に複数のコアを設け、各コアに異なる光信号を送信することで、ファイバあたり及び断面積あたりの伝送容量を飛躍的に高めることが可能である。マルチコアファイバ伝送方式を更に大別すると非結合方式とランダム結合方式があり、非結合方式では信号は各入射コアに閉じ込められたまま受信端まで伝送される。従来のSMF用の光送受信技術が使用できる点で早期実用化に適しているが、コア間での信号漏れであるクロストークを低く抑える必要があり、結果として収容可能なコア数に強い制限が加わる。ランダム結合方式では信号はコア間をランダムに推移しながら受信端へ到達する。受信器では伝送中に混合した各コアの信号をMIMO (Multi Input Multi Output) デジタル信号処理(DSP: Digital Signal Processing)によって分離する必要があるが、実用化には専用の集積DSP回路の開発が必須であるが、非結合方式よりも多数のコアを収容することができ、非結合方式の次の世代を担う伝送媒体として期待される。

ファイバ伝送容量を上げるための第二のカギはマルチモード伝送技術である。SMFの場合、光信号の閉じ込めはコアの中心軸に集中した電場分布をもつ基本モードのみで可能であるが、マルチモードファイバではコア径や屈折率分布に応じて複数の電場分布による光信号の閉じ込めが可能であり、それぞれのモードに異なる信号を載せることで伝送容量を増やすことができる。マルチモード伝送においてもモード間の信号の混合を抑えた弱結合伝送と、モード間の信号混合を前提とする強結合伝送の2通りがあるが、長距離にわたり弱結合を維持することは難しいため、強結合が主流である。強結合マルチモード伝送は潜在的には最も高い空間利用効率を実現し得るが、必要なMIMO処理の規模は膨大なものとなり得る。マルチコアファイバ伝送方式とマルチモード伝送方式はクラッド領域内の空間的な利用効率を高めるという点が共通しており、総称して空間多重(SDM: Space Division Multiplexing)方式と呼ばれる。

第三のカギはマルチバンド波長多重である。従来の光通信ではSMFの吸収損失が最小で、かつエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)による増幅中継が可能であるC波長帯(1,530 ~ 1,565 nm)や、若干損失が大きいがEDFAで増幅中継が可能なL波長帯(1,565 ~ 1,625 nm)を活用して波長多重通信が行われている。ここにトリウム

表1 今中長期における標準外径SDM光ファイバ伝送の代表的な成果

伝送方式	コア数、モード数	伝送容量 (b/s)	伝送距離 (km)	容量・距離積 (Eb/s km)	波長帯域
非結合型マルチコア	1区間	4 1.01 P	51.7	0.05	S, C, L
	中継伝送	4 319 T	3,001	0.96	S, C, L
	中継伝送	4 138.9 T	12,345	1.71	S, C, L
ランダム結合型マルチコア	1区間	19 1.7 P	63.5	0.11	C, L
マルチモード	1区間	55 1.53 P	25.9	0.04	C
	1区間	55 3.56 P	12.5	0.04	C, L
	中継伝送	15 273.6 T	1,001	0.27	C

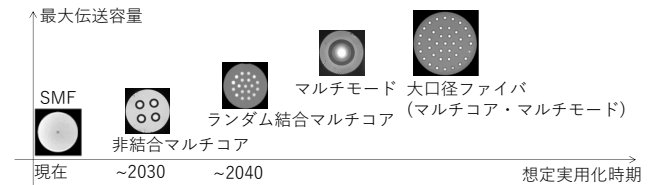


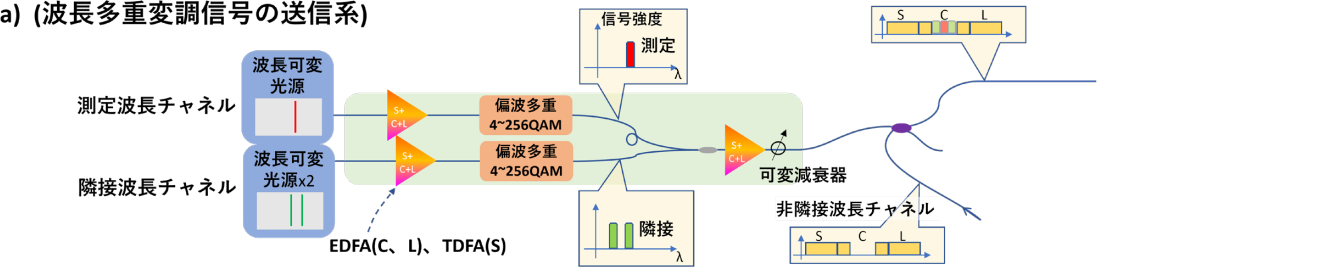
図1 各種SDM光ファイバの最大伝送容量と実用化のイメージ

添加光ファイバ増幅器(TDFA: Thulium-doped fiber amplifier)や分布ラマン増幅などの新たな増幅技術を併用することで、S帯(1,460 ~ 1,530 nm)などの新しい波長帯域を加え、波長チャネル数を増大させることができる。

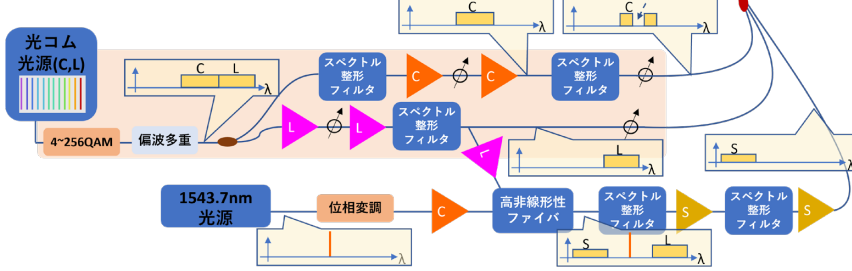
2010年代から急速に発展を遂げたマルチコアファイバは、まずはコア数スケーラビリティを重視する観点から、SMFの外径を上回る大口径の光ファイバを中心に開発された。しかし近年では、既存製造設備によるケーブル化の可能性、強いファイバ曲げや引っ張りに対する破断率の低さ、ファイバ融着接続の容易さ等の利点から、SMFと同等のクラッド径を持つ標準外径型のSDM光ファイバ技術が特に注目を集めている。NICTでも各種の標準外径SDM光ファイバを用いた伝送技術の開発に取り組んでおり、革新的な光ファイバと世界最高水準を誇る大容量伝送評価システムの組み合わせにより、伝送容量や容量・距離積の記録を年々更新し続けている(表1)[5]-[11]。

本稿ではNICTの今中長期における標準外径のSDM光ファイバ伝送の成果を概説する。前述の様にSDMで用いる光ファイバは非結合マルチコア、ランダム結合マルチコア、マルチモードに大別され、それぞれの実用化に向けたイメージは図1に示すとおりである。2で基本的な実験構成を説明したのちにそれぞれの方式における伝送実験の成果を紹介し、3では実環境テストベッドで行われたフィールド実証[12]の結果を説明する。

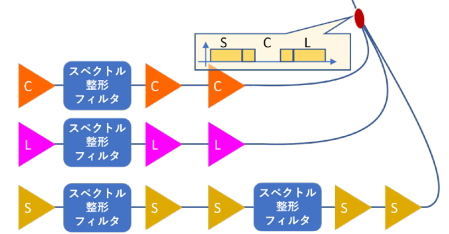
(a) (波長多重変調信号の送信系)



非隣接波長チャンネル生成 (広帯域版)



非隣接波長チャンネル生成 (簡略版)



(b)

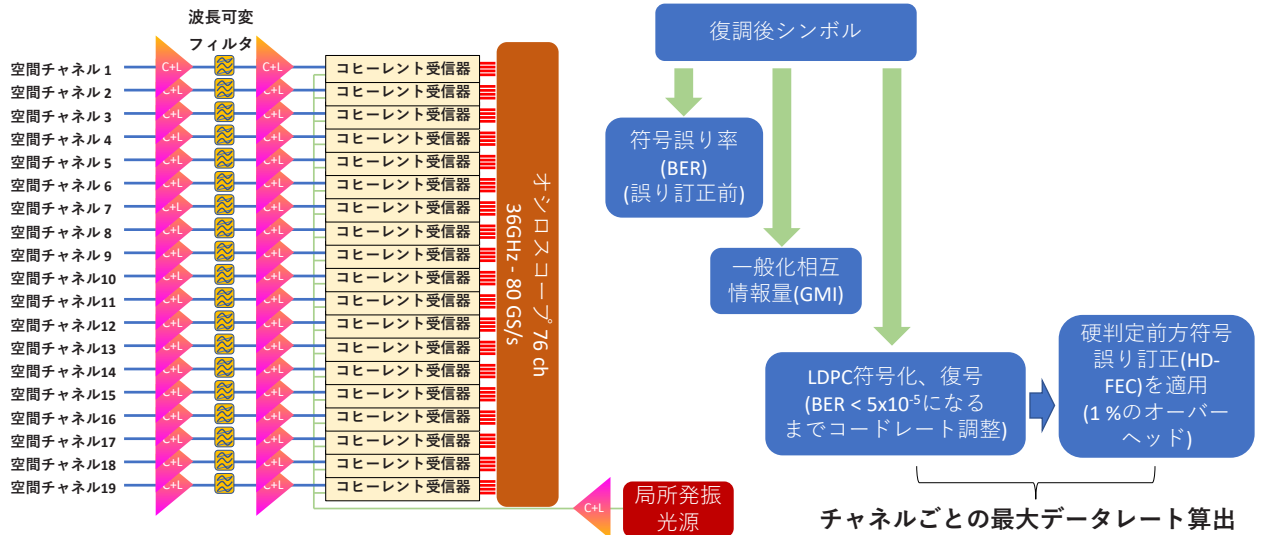


図2 伝送実験の基本構成 (a) 送信系 (S、C、L 帯)、(b) 受信系の例 (19 コア) と信号の性能評価手順

## 2 NICT における伝送実験

### 2.1 伝送実験の基本構成

本稿で説明する伝送実験には共通部が多いため、個別解説に先立ち代表的な構成を本章で説明する。図2 (a) は波長多重信号の送信系を表しており、図では S、C、L 帯をカバーする構成となっているが、それぞれの実験においては利用した波長帯域に応じて適宜簡略化されている。C 帯、L 帯の信号増幅には EDFA を用いるのに対し、S 帯では TDFA を用いる。周波数グリッドは 25 GHz を用いる。理想的には全波長チャンネルを高品質で生成すべきであるが、実験機器の数は限られているため、測定に用いる波長チャンネルとそれに隣接する 2 つの波長チャンネルだけを高品質で生成し、他の波長チャンネルにはダミー信号を用いる。測定/隣接チャンネルの搬送波を低位相雑音の波長可変光源で生

成し、それぞれを変調速度 24.5 GBaud かつルートレイズドコサインフィルタ (ロールオフ係数 0.01) で整形された多値疑似ランダム IQ 信号と偏波多重型の LiNbO<sub>3</sub> 変調器で変調することで、多値度 4 から 256 までの偏波多重直交振幅変調 (DP-QAM: Dual Polarization Quadrature Amplitude Modulation) 光信号を 3 波長チャンネル分生成する。またダミー信号は C、L 帯をカバーする光波長コム光源 [13] や、高非線形性ファイバ内での四光波混合を用いた S 帯への波長変換、あるいは各種光増幅器からの増幅誘導放出光などを用いて連続スペクトル光を生成し、さらに LCOS によりプログラム可能なスペクトル整形フィルタを用いて測定波長チャンネル及び隣接波長チャンネルに相当する波長チャンネルに空きスロットを作ることで生成した。ダミー信号を測定/隣接波長チャンネルと合波し、各空間多重チャンネルへと分岐した後空間多重ファイバで送信する。



受信側では空間多重チャンネルごとに信号増幅と波長多重分離、コヒーレント受信を行い、受信信号をデータとして保存した後に MIMO を含むオフライン DSP を適用して送信信号を復調した。図 2 (b) は空間チャンネル数 19 の場合の受信器構成を示している。高速・多チャンネル型のオシロスコープを活用することで、最大 20 空間チャンネルの偏波多重 IQ 信号をイントラダイン受信できる。これを上回るチャンネル数の信号を受信するためには、後述の 55 モード伝送実験の様に時分割受信技術を併用する必要がある。

DSP による復調後の信号に対しては符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) や一般化相互情報量 (GMI: Generalized Mutual Information) [14] の算出に加え、ランダム抽出した送受信シンボルを用いて可変コードレートの LDPC (Low-Density Parity-Check Code) 符号列を生成し、後段において硬判定前方符号誤り訂正 (HD-FEC: Hard-Decision Forward Error Correction) を加える前提で、エラーフリーを達成可能な最小のコードレートを算出した。得られたコードレートと HD-FEC のオーバーヘッドを基に、各波長チャンネルにおける最大実現可能なデータレートを算出し、信号品質を評価した。

### 2.2 非結合マルチコアファイバ伝送

非結合マルチコアファイバ伝送に関し、我々は標準外径 4 コアファイバ [15] とマルチバンド波長多重を用いて、データセンタやメトロネットワーク等での利用に向けた短距離大容量伝送技術と、基幹回線での利用

に向けた長距離伝送技術の開発を行った。短距離伝送では図 3 (a) に示した構成で偏波多重 256 QAM 変調を使用し、S 帯 335 チャンネル、C 帯 200 チャンネル、L 帯 266 チャンネルの合計 801 波長チャンネルを用いて、合計データレートで 1.01 Pb/s を達成した [5]。合計 20 THz に及ぶ周波数帯域を利用した波長多重通信は世界初である。広帯域化の一つのカギは伝送ファイバ中における分布ラマン増幅である。元来 S 帯ではファイバの吸収損失が大きいが、信号光よりも 100 nm ほど波長の短い励起光をファイバに対向入射することでラマン散乱による光増幅を伝送中に起こし、損失を補償できる。図 3 (b) に示す様な多数の励起光を、空間結合型の励起光結合器により受信側からファイバに入射することで、S から C 帯にかけて広帯域のラマン利得が得られた。図 3 (c) は GMI からの推定によるデータレートの評価結果で、全コア全波長の合計で 1.01 Pb/s となる。

長距離伝送では偏波多重 16 QAM 変調で伝送容量 319 Tb/s と伝送距離 3,001 km [6]、偏波多重 QPSK (4 QAM) 変調で伝送容量 138.9 Tb/s と伝送距離 12,345 km を達成した [7]。後者の実験系を図 3 (d) に示す。中継間隔約 80 km、一周あたり 2 中継で周回伝送系を組み、S 帯 138 チャンネル、C 帯 189 チャンネル、L 帯 191 チャンネルの合計 518 波長チャンネルの信号を音響光学変調器 (Acousto-Optic Modulator) によってパルス化し、75 回周回させた。データレートの評価結果は図 3 (e) の通りである。伝送容量・距離積は 16 QAM 変調では 0.96 Eb/s km であったのに対し、QPSK 変調の場合は 1.71 Eb/s km に達した。これらは本稿執筆時

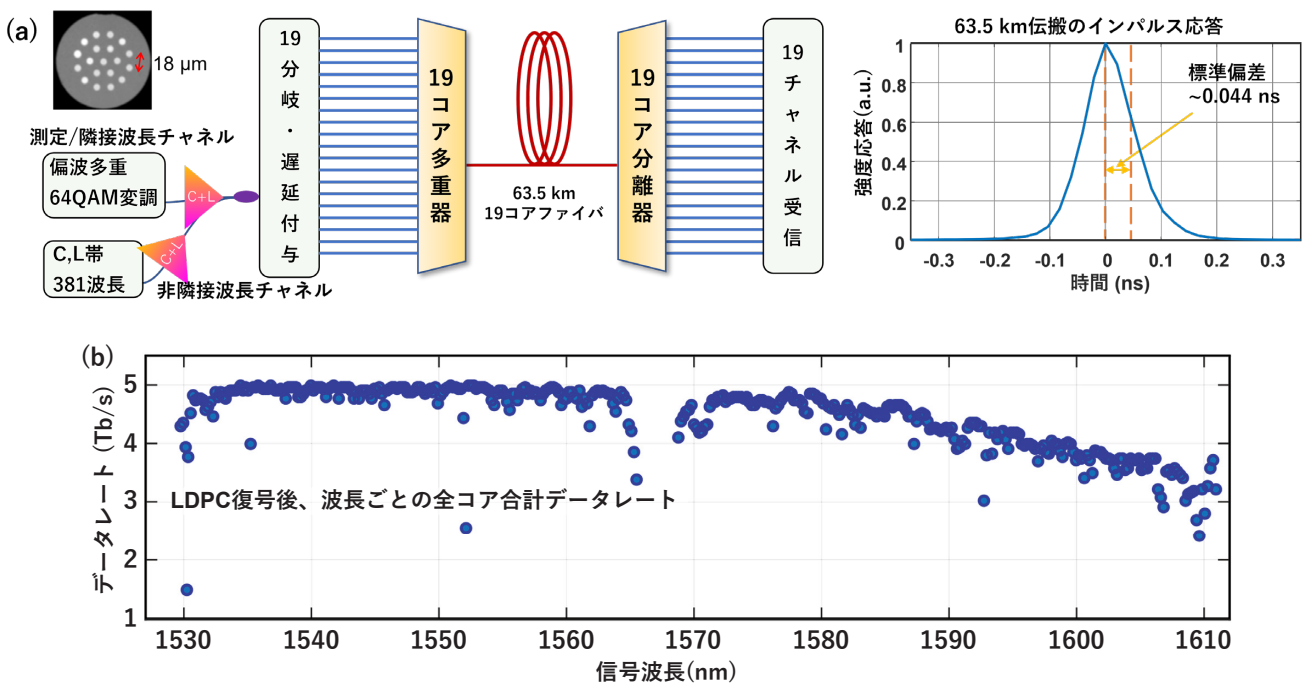


図 4 ランダム結合 19 コアファイバ伝送実験 (a) 実験構成、(b) 1.7 Pb/s 伝送結果

## 2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

において、標準外径光ファイバの伝送容量・距離積の最上位記録となる。

### 2.3 ランダム結合マルチコアファイバ伝送

非結合マルチコアファイバの次の世代を担う長距離伝送用の媒体として、ランダム結合型の標準外径19コア光ファイバを国内メーカーと共同で開発した [8]。図4(a)に示す3層円環構造で配置されたコアは間隔が約18 $\mu\text{m}$ となる様に設計されており、コアに入射した信号は特性の均一化された全コアの伝搬モードをランダムに推移しながら伝搬していく。これ以上にコア間隔を狭めると伝搬モードの強結合(スーパーモード化)が起り、スーパーモード間に伝搬特性の差が生じてMIMO処理の負担が増大してしまう。本ファイバは強結合を避け、ランダム結合型として最大のコア密度を実現した。63.5 km 伝搬後の全コア合計のインパルス応答は標準偏差0.044 nsのガウス関数型で、既報の少コア数ランダム結合ファイバとほぼ同水準の応答広がりを実現している [16]-[20]。これはMIMO処理で必要

なフィルタのサイズが小さいことを意味している。吸収損失も波長1,550 nmで0.215 dB/kmと低かった。C、L帯381波長チャネルの偏波多重64 QAM変調信号で評価した本ファイバの単一区間伝送データレートは図4(b)に示されており、合計データレートは1.7 Pb/sとなった。今後の長距離伝送の実証により伝送容量・距離積の記録更新が期待される。

### 2.4 マルチモード伝送

マルチモードファイバは一般にランダム結合マルチコアファイバに比べてインパルス応答の幅が広く、MIMO処理の負荷が大きくなるため、実用化のハードルは高い。しかしより高い空間利用効率を実現し得るため、比較的短距離の用途としては将来活用の可能性があり得る。NICTでは海外研究機関と協力し、55モードを導波可能なマルチモードファイバ [21] と多重反射位相板によるモード多重器 [22] を用いて、本稿執筆時には最大のモード数となる55モードの単一区間伝送を実証した [9]。構成図を図5(a)に示す。コヒーレン

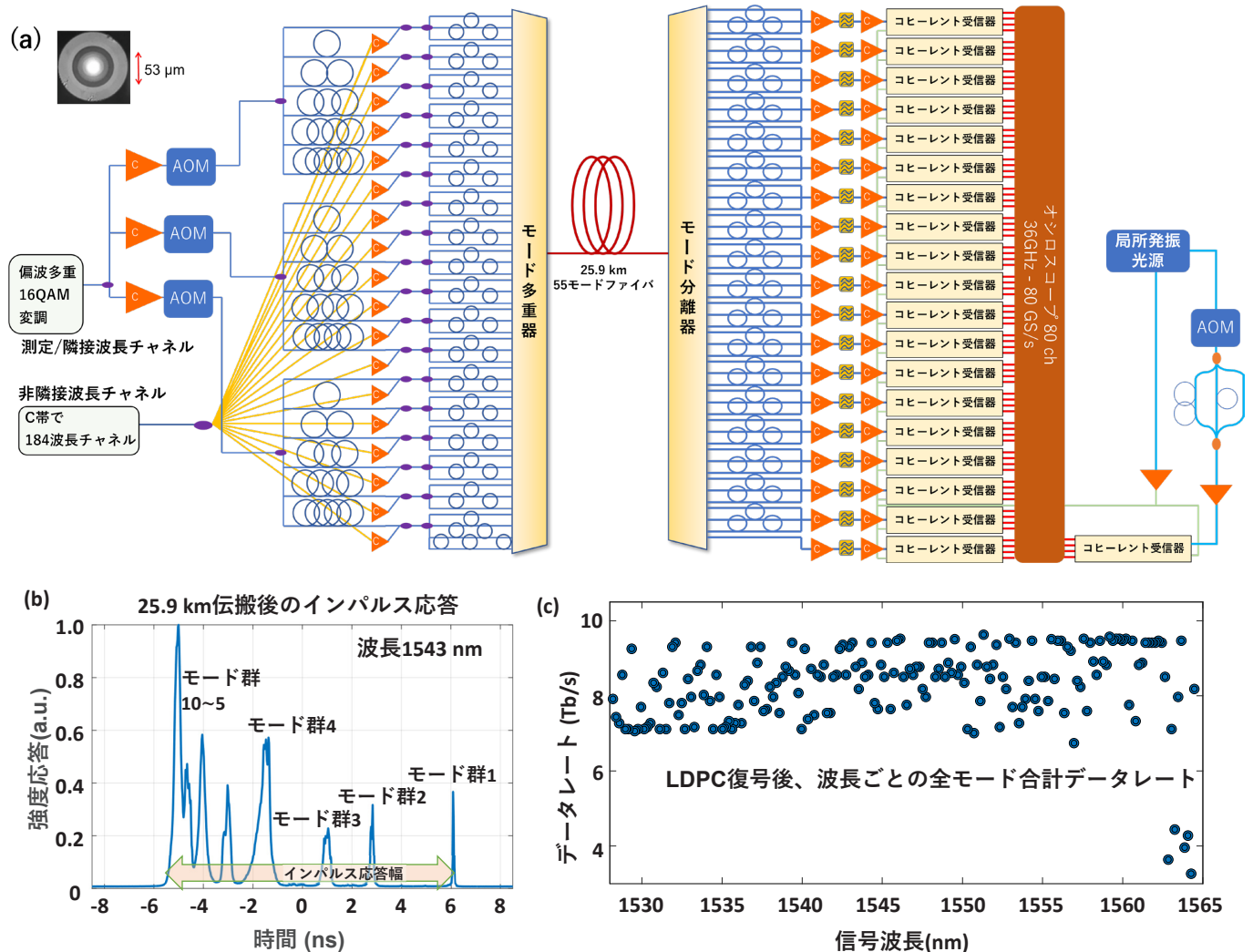


図5 55モード伝送実験 (a) 実験構成、(b) インパルス応答、(c) 1.53 Pb/s 伝送結果

ト受信器の台数を上回るモード数の信号を受信するために、AOMを用いて送信信号をパルス化し、時間を分けて3モード分の信号を1つの受信器で受信する時分割受信を行った。ファイバは波長1540 nmにおいてモード間の群遅延差が極力少なくなるよう設計されたが、図5(b)に示すように25.9 km伝搬後の全モード合計のインパルス応答の幅は約12 nsであり、ランダム結合型マルチコアファイバに比べると非常に大きな幅となっている。図5(c)はC帯184波長チャンネルの偏

波多重16 QAM変調信号を用いて評価した伝送データレートの結果を示しており、合計のデータレートは1.53 Pb/sとなった。また伝送距離を約半分の12.5 kmにする必要があったが、C、L帯383波長チャンネルを利用することで総伝送容量を3.56 Pb/sに拡大することにも成功した[10]。

マルチモード伝送は伝送距離に応じてインパルス応答幅が増大し、さらにモード依存損失の増大により高次モードの信号が劣化していくため、長距離化は一般

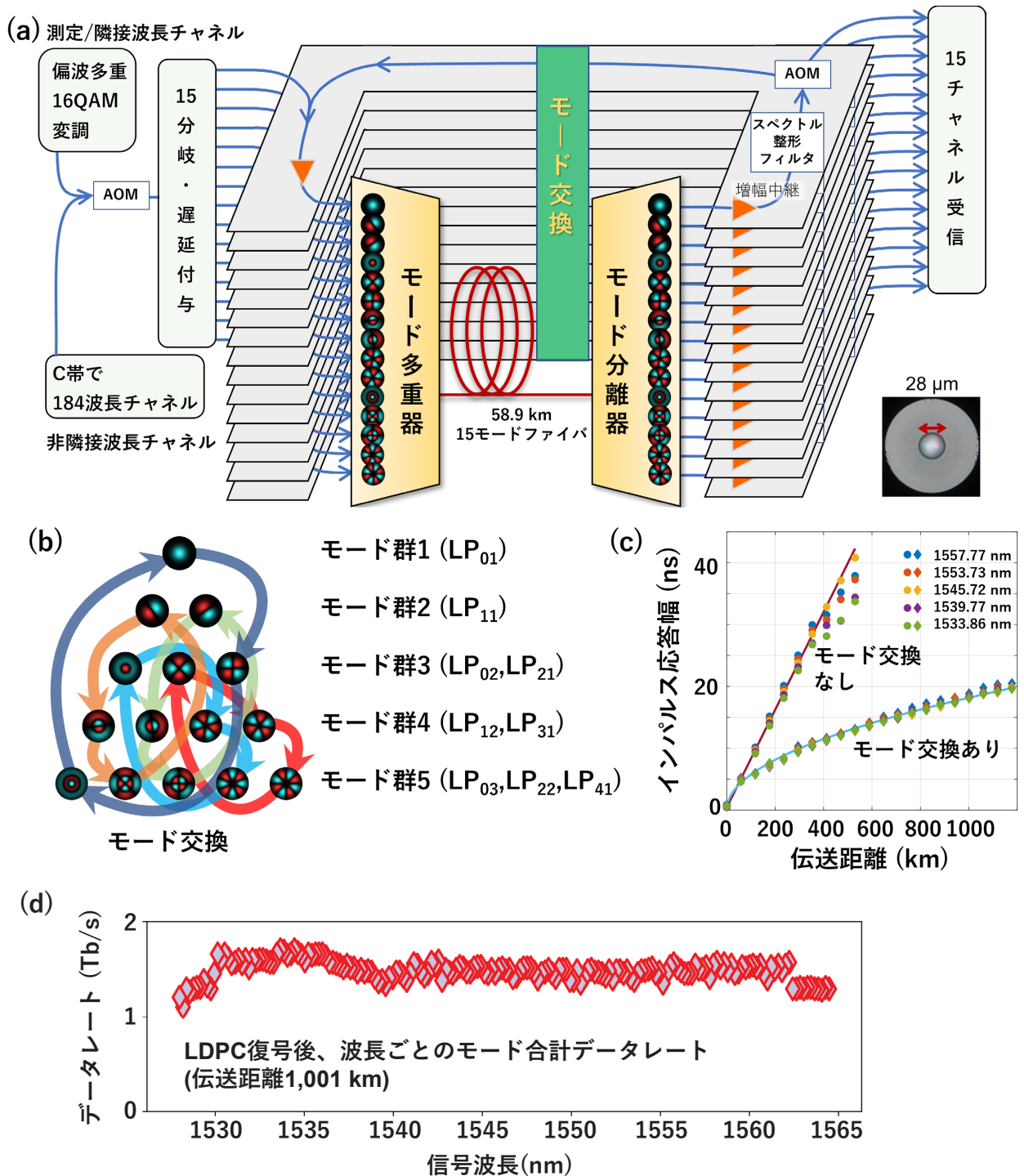


図6 15モード中継伝送実験 (a) 実験構成、(b) 中継点でのモード交換ダイアグラム、(c) インパルス応答幅と伝送距離、(d) 1,001 km 伝送結果

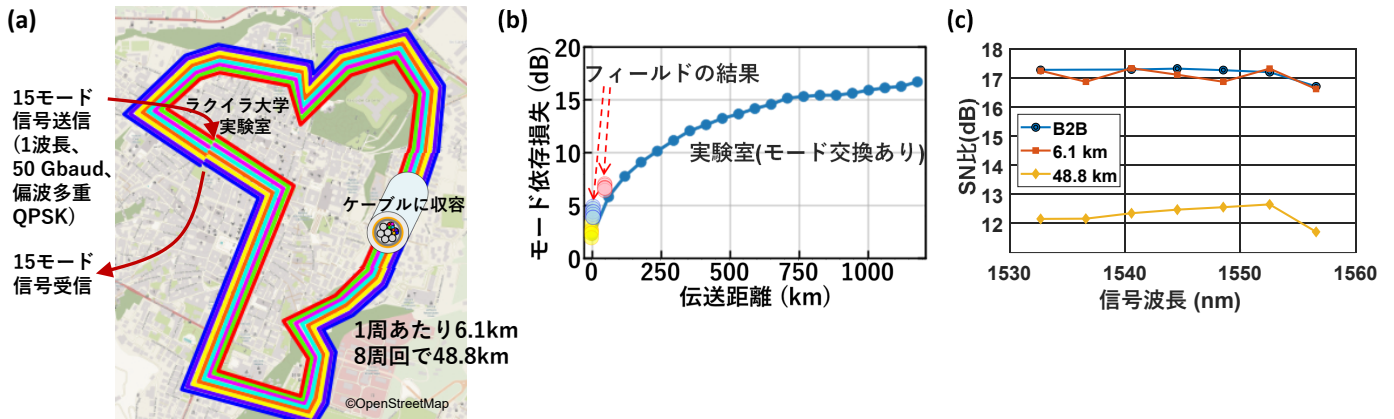


図7 15モードファイバ伝送のフィールド実証 (a) ラクイラ市街のケーブル敷設経路 (b) フィールド環境と実験室環境でのモード依存損失の比較 (c) 信号品質 (SN比) の測定結果

的に難しい。NICTでは各モード多重信号が経由するモードを中継点において載せ替えるモード交換方式 [23] を利用して、15モードファイバで初となる中継増幅伝送を実施し、C帯全域に及ぶ容量 273.6 Tb/s の偏波多重 16 QAM 信号を 1,001 km 伝送させることに成功した [11]。伝送容量・距離積は 0.27 Eb/s km で、マルチモード伝送としてはこれまでの記録 [24] を 2 倍以上更新するものである。実験系は図 6(a) に示される様に、モード合波器/分波器と、従来型の光増幅器、スペクトル整形フィルタ、AOM による周回制御スイッチを用いた 15 個の周回伝送系から成る。周回ごとに図 6(b) に示される様に信号モードの載せ替えを行った結果、インパルス応答幅の距離に応じた広がりをも 20 ns 程度まで抑制することに成功した (図 6(c)) [11][25][26]。モード依存損失 (図 7(b) 参照) も 18 dB 未満に抑えられた。図 6(d) は 1,001 km 伝送後のデータレートの評価結果である。

### 3 フィールド実証

実験室内での実証実験に加えて、実環境下でも SDM 光ファイバの検証を行っている。イタリアのラクイラ市街に敷設された 15 モードファイバ収容ケーブルを利用し (図 7(a))、ラクイラ大学内の実験室から信号を送受信して特性評価を行った [12]。敷設ケーブルは一周の長さが 6.1 km で、ケーブル内に 8 本の 15 モードファイバが収容されており、これらのファイバを実験室内で直列接続して総長 48.8 km のリンクを作り上げた。前述の NICT における 15 モードファイバ実験と比較すると、測定条件は同一ではないものの、モード依存損失 (図 7(b)) やインパルス応答幅の広がり (6 ns 未満) に関して大きな差は認められなかった。変調速度 50 GBaud、1 波長の偏波多重 QPSK 変調を用い、信号波長を C 帯内で走査して測定した結果、約

25 nm の波長範囲で HD-FEC 閾値以上に相当する良好な信号品質 (SN (Signal-to-Noise) 比) が得られた (図 7(c))。非結合マルチコアファイバや 4 コアのランダム結合マルチコアファイバについても他機関によるものを含めフィールド実証が報告されている [27]–[31] が、19 コアファイバについてはまだ実証例はなく、今後の重要な課題の一つである。

### 4 おわりに

標準外径を有する非結合マルチコアファイバ、ランダム結合マルチコアファイバ、マルチモードファイバそれぞれに関して伝送実験を実施し、単一区間における 1 Pb/s 以上の超大容量伝送や、100 Tb/s を上回る大容量かつ長距離の伝送を実証してきた。非結合マルチコアファイバではマルチバンド波長多重を追求し、現時点では最高の伝送容量・距離積が達成されている。ランダム結合マルチコアファイバやマルチモードファイバについてはコア数やモード数の拡大が行われ、現状でも非結合マルチコアファイバを上回る伝送容量が単一区間で達成されているが、長距離化やマルチバンド化が未達成である。今後これらの課題を追求するとともに、光増幅器や光スイッチ等、各コンポーネントの空間多重化を図り、システム性能の改善につなげていくことが実用化に向け重要であると考えられる。

### 謝辞

本成果の達成に貢献した、シュツットガルト大学の Georg Rademacher 博士、アイントホーフェン工科大学の Menno van den Hout 氏、ラクイラ大学の Giammarco Di Sciuillo 氏及び関係機関の各氏に謝意を表す。



## 【参考文献】

- 1 [https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban04\\_02000210.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000210.html) Feb.15, 2023.
- 2 D. Kakuta, T. Yamamoto, S. Tetsutani, and K. Shiraki, "Development of Small Diameter 1000-fiber Underground Optical Cable for Effective Utilization of Underground Infrastructure Facilities," Proc. 58th International Wire and Cable Symposium (IWCS), pp.289–292, Nov. 2009.
- 3 T. Sasaki, F. Sato, B. G. Risch, and P. A. Weimann, "Ultrahigh Fiber Count and High-Density Cables, Deployments, and Systems," Proc. the IEEE, vol.110, no.11, pp.1760–1771, Nov. 11, 2022.
- 4 <https://medusasc.com/>
- 5 B. J. Puttnam, R. S. Luis, G. Rademacher, Y. Awaji, and H. Furukawa, "1 Pb/s Transmission in a 125 $\mu$ m diameter 4-core MCF," Proc. 42nd Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), JTh6B.1, May 19, 2022.
- 6 B. J. Puttnam, R. S. Luis, G. Rademacher, Y. Awaji, and H. Furukawa, "High-Throughput and Long-Distance Transmission with >120 nm S-, C- and L-Band Signal in a 125 $\mu$ m 4-Core Fiber," Journal of Lightwave Technology, vol.40, no.6, pp.1633–1639, March 15, 2022.
- 7 M. van den Hout, B. J. Puttnam, G. Di Sciullo, R. S. Luis, G. Rademacher, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Transmission of 138.9 Tb/s over 12 345 km of 125 $\mu$ m cladding diameter 4-core fiber using signals spanning S, C and L-band," Proc. 49th European Conference on Optical Communication (ECOC), M.A.5.5, Oct. 2, 2023.
- 8 G. Rademacher, M. van den Hout, R. S. Luis, B. J. Puttnam, G. Di Sciullo, T. Hayashi, A. Inoue, T. Nagashima, S. Gross, A. Ross-Adams, M. J. Withford, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Randomly Coupled 19-Core Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," Proc. 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4A.4, March 9, 2023.
- 9 G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, M. Mazur, H. Chen, R. Ryf, D. T. Neilson, D. Dahl, J. Carpenter, P. Sillard, F. Achten, M. Bigot, J. Sakaguchi, and H. Furukawa, "1.53 Peta-bit/s C-Band Transmission in a 55-Mode Fiber," Proc. 48th European Conference on Optical Communication (ECOC), Th3C.3, Sept. 22, 2022.
- 10 G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, M. Mazur, H. Chen, R. Ryf, D. T. Neilson, D. Dahl, J. Carpenter, P. Sillard, F. Achten, M. Bigot, J. Sakaguchi, and H. Furukawa, "3.56 Peta-bit/s C+L Band Transmission over a 55-mode Multi-Mode Fiber," Proc. 49th European Conference on Optical Communication (ECOC), We.A.1.1, Oct. 4, 2023.
- 11 M. van den Hout, G. Di Sciullo, G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, M. Mazur, D. T. Neilson, P. Sillard, F. Achten, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "273.6 Tb/s Transmission Over 1001 km of 15-Mode Fiber Using 16-QAM C-Band Signals," Proc. 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4B.5, March 9, 2023.
- 12 G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, G. Di Sciullo, R. Emmerich, N. Braig-Christophersen, A. Marotta, L. Dallachiesa, R. Ryf, A. Mecozzi, C. Schubert, P. Sillard, F. Achten, G. Ferri, J. Sakaguchi, C. Antonelli, and H. Furukawa, "Characterization of the First Field-Deployed 15-Mode Fiber Cable for High Density Space-Division Multiplexing," Proc. 48th European Conference on Optical Communication (ECOC), Th3B.1, Sept. 22, 2022.
- 13 B. P. -P. Kuo, E. Myslivets, V. Ataie, E. G. Temprana, N. Alic, and S. Radic, "Wideband parametric frequency comb as coherent optical carrier," Journal of Lightwave Technology, vol.31, no.21, pp.3414–3419, Nov. 1, 2013.
- 14 A. Alvarado, E. Agrell, D. Lavery, R. Maher, and P. Bayvel, "Replacing the Soft-Decision FEC Limit Paradigm in the Design of Optical Communication Systems," Journal of Lightwave Technology, vol.33, no.20, pp.4338–4352, Oct. 15, 2015.
- 15 T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Abe, S. Aozasa, Y. Wakayama, H. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto, and K. Nakajima, "118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," Proc. 22nd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), PDP2, Aug. 4, 2017.
- 16 G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, R. Ryf, S. van der Heide, T. A. Eriksson, N. K. Fontaine, H. Chen, R.-J. Essiambre, Y. Awaji, H. Furukawa, and N. Wada, "High Capacity Transmission in a Coupled-Core Three-Core Multi-Core Fiber," Journal of Lightwave Technology, vol.39, no.3, pp.757–762, Feb. 1, 2021.
- 17 T. Hayashi, Y. Tamura, T. Hasegawa, and T. Taru, "Record-Low Spatial Mode Dispersion and Ultra-Low Loss Coupled Multi-Core Fiber for Ultra-Long-Haul Transmission," Journal of Lightwave Technology, vol.35, no.3, pp.450–457, Feb. 1, 2017.
- 18 R. Ryf, N. K. Fontaine, B. Guan, R.-J. Essiambre, S. Randel, A. H. Gnauck, S. Chandrasekhar, A. Adamiecki, G. Raybon, B. Ercan, R. P. Scott, S. J. Ben Yoo, T. Hayashi, T. Nagashima, and T. Sasaki, "1705-km Transmission over Coupled-Core Fibre Supporting 6 Spatial Modes," Proc. 40th European Conference on Optical Communication (ECOC), PD3.2, Sept. 25, 2014.
- 19 R. Ryf, J. C. Alvarado-Zacarias, S. Wittek, N. K. Fontaine, R.-J. Essiambre, H. Chen, R. Amezcua-Correa, H. Sakuma, T. Hayashi, and T. Hasegawa, "Coupled-Core Transmission over 7-Core Fiber," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4B.3, March 7, 2019.
- 20 T. Sakamoto, M. Wada, S. Aozasa, R. Imada, T. Yamamoto, and K. Nakajima, "Characteristics of Randomly Coupled 12-core Erbium-Doped Fiber Amplifier," Journal of Lightwave Technology, vol.39, no.4, pp.1186–1193, Feb. 15, 2021.
- 21 P. Sillard, M. Bigot, K. de Jongh, F. Achten, G. Rademacher, R. S. Luis, and B. J. Puttnam, "55-Spatial-Mode Fiber for Space Division Multiplexing," Proc. 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), M4B.5, March 6, 2023.
- 22 N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, D. T. Neilson, K. Kim, and J. Carpenter, "Laguerre-Gaussian mode sorter," Nature Communications, vol.10, 1865, April 26, 2019.
- 23 K. Shibahara, M. Hoshi, and Y. Miyamoto, "10-Spatial-Mode 1300-km Transmission Over 6-LP Graded Index Few-Mode Fiber With 36-ns Modal Dispersion," Proc. 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), M2B.2, March 6, 2023.
- 24 K. Shibahara, T. Mizuno, H. Kawakami, T. Kobayashi, M. Nakamura, K. Shikama, K. Nakajima, and Y. Miyamoto, "Full C-Band 3060-km DMD-Unmanaged 3-Mode Transmission With 40.2-Tb/s Capacity Using Cyclic Mode Permutation," Journal of Lightwave Technology, vol.38, no.2, pp.514–521, Jan. 15, 2020.
- 25 G. Di Sciullo, M. van den Hout, G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, M. Mazur, D. T. Neilson, P. Sillard, F. Achten, J. Sakaguchi, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Modal Dispersion Mitigation in a long-haul 15-Mode Fiber link through Mode Permutation," Proc. IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting, WC1.3, July 19, 2023.
- 26 G. Di Sciullo, M. van den Hout, G. Rademacher, Ruben S. Luis, B. J. Puttnam, N. K. Fontaine, R. Ryf, H. Chen, M. Mazur, D. T. Neilson, P. Sillard, F. Achten, J. Sakaguchi, C. Okonkwo, A. Mecozzi, C. Antonelli, and H. Furukawa, "Reduction of Modal Dispersion in a long-haul 15-Mode Fiber link," by means of Mode Permutation," Proc. 49th European Conference on Optical Communication (ECOC), We.A.1.2, Oct. 4, 2023.
- 27 M. Zahidy, D. Ribezzo, C. De Lazzari, I. Vagniluca, N. Biagi, T. Occhipinti, L. K. Oxenl we, M. Gallii, T. Hayashi, C. Antonelli, A. Mecozzi, A. Zavatta, and D. Bacco, "4-Dimensional Quantum Key Distribution Protocol over 52-km Deployed Multicore Fibre," Proc. 48th European Conference on Optical Communication (ECOC), Th3C.6, Sept. 22, 2022.
- 28 R. Ryf, A. Marotta, M. Mazur, N. K. Fontaine, H. Chen, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Morishima, F. Graziosi, A. Mecozzi, and C. Antonelli, "Transmission over Randomly-Coupled 4-Core Fiber in Field-Deployed Multi-Core Fiber Cable," Proc. 46th European Conference on Optical Communication (ECOC), Mo2E-1, Dec. 10, 2020.
- 29 M. Mazur, R. Ryf, N. K. Fontaine, A. Marotta, E. Bj rjeson, L. Dallachiesa, H. Chen, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Morishima, F. Graziosi, L. Palmieri, D. T. Neilson, P. Larsson-Edefors, A. Mecozzi, and C. Antonelli, "Real-time MIMO transmission over field-deployed coupled-core multi-core fibers," Proc. 45th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4B.8, March 10, 2022.
- 30 N. Sambo, A. Nespola, A. Sgambelluri, A. Marotta, L. Dallachiesa, R. Ryf, P. Castoldi, A. Mecozzi, T. Hayashi, A. Carena, and C. Antonelli, "Field Trial of SDN-Controlled Probabilistic Constellation Shaping Supporting Multiple Rates Over a Coupled-Core Multi-Core Fiber," Journal of Lightwave Technology, vol.41, no.12, pp.3660–3667, June 15, 2023.
- 31 R. S. Luis, G. Di Sciullo, G. Rademacher, B. Puttnam, A. Marotta,

## 2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

R. Emmerich, N. Braig-Christophersen, R. Stolte, F. Graziosi, A. Mecozzi, C. Schubert, T. Hayashi, T. Nagashima, C. Antonelli, and H. Furukawa, "Colorless and Directionless ROADM for Meshed Coupled-Core Multicore Fiber Networks," Proc. 46th Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4C.3, March 9, 2023.



**坂口 淳** (さかぐち じゅん)

ネットワーク研究所  
フォトリック ICT 研究センター  
フォトリックネットワーク研究室  
主任研究員  
博士(理学)  
博士(工学)  
コヒーレント光通信、光デバイス、信号処理  
【受賞歴】  
2020年 第65回(令和元年度)前島密賞  
2016年 第30回 独創性を拓く 先端技術大賞  
企業・産学部門 特別賞  
2015年 Nature Photonics Best Postdeadline Paper Award



**Benjamin J. PUTTNAM** (ベンジャミン・J・パットナム)

Chief Senior Researcher,  
Photonic Network Laboratory,  
Photonic ICT Research Center,  
Network Research Institute  
Ph.D.  
Optical Communication, Optical Signal  
Processing  
【受賞歴】  
2020年 第65回(令和元年度)前島密賞  
2016年 第30回 独創性を拓く 先端技術大賞  
企業・産学部門 特別賞  
2015年 Nature Photonics Best Postdeadline Paper Award



**Ruben Soares LUÍS** (ルーベンソアレスルイス)

Senior Researcher,  
Photonic Network Laboratory,  
Photonic ICT Research Center,  
Network Research Institute  
Ph.D.  
Optical Communication, Datacenter  
Networks, Optical Switching and  
Networking, Signal Processing  
【受賞歴】  
2020年 第65回(令和元年度)前島密賞  
2016年 第30回 独創性を拓く 先端技術大賞  
企業・産学部門 特別賞  
2015年 Nature Photonics Best  
Postdeadline Paper Award